

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
FAKULTA STROJNÍ  
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství

**HODNOCENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ GEOPOLYMERNÍCH  
MATERIÁLŮ PLNĚNÝCH VLÁKNOVÝMI PLNIVY**

**EVALUATION OF SELECTED PROPERTIES OF GEOPOLYMER  
MATERIALS FILLED WITH FIBER FILLERS**

**KMT – B – 185**

**Miroslav Šolc**

Vedoucí práce:	doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Trinh Thi Linh
Počet stran:	54
Počet tabulek:	58
Počet obrázků:	16
Počet grafů:	13

Datum: 6.1.2012



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
FAKULTA STROJNÍ  
KATEDRA MATERIÁLU

HÁLKOVA 6, 461 17 LIBEREC

ANOTACE

STUDIJNÍ PROGRAM:	Strojírenství
OBOR:	Materiály a technologie
ZAMĚŘENÍ:	Materiálové inženýrství
AUTOR:	Miroslav Šolc
TÉMA PRÁCE:	Hodnocení vybraných vlastností geopolymerních materiálů plněných vláknovými plnivy
ČÍSLO PRÁCE:	KMT – B – 185
VEDOUCÍ PRÁCE:	doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
KONZULTANT:	Ing. Trinh Thi Linh

Bakalářská práce se zabývá hodnocením vlivu krátkých odpadních vláken jako příměsi geopolymerních směsí na pevnost výsledných kompozitů. Vliv vláken v kompozitu byl hodnocen pomocí mechanické zkoušky tlakem.

V teoretické části jsou popsány vlastnosti, využití a ostatní obecné informace o geopolymerech a všech plnivech použitých v experimentu. V experimentální části je uveden popis zkušební metody, pracovní postup, popis zkušebních vzorků, jejich složení a úprava. Naměřené a vypočtené hodnoty byly zpracovány do tabulek a grafů.

Klíčová slova: geopolymer, vláknové plnivo, teplárenský popílek, pevnost v tlaku, křehkost, kompozitní materiál

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE

HÁLKOVA 6, 461 17 LIBEREC

ANNOTATION

STUDY PROGRAMME:	Mechanical Engineering
STUDY DISCIPLINE:	Materials and Technologies
STUDY DIRECTION:	Material Engineering
AUTHOR:	Miroslav Šolc
WORK TOPIC:	Evaluation of selected properties of geopolymer materials filled with fiber fillers
NUMBER OF THE WORK:	KMT – B – 185
LEADER OF THE WORK:	doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
CONSULTER:	Ing. Trinh Thi Linh

This bachelor work deals with strength evaluation of geopolymer materials filled with fiber fillers.

The theoretical part describes the properties, uses and other general information about geopolymers and all the fillers used in the experiment. The experiment section describes the test method, workflow, test samples and their composition and editing. Measured and calculated values are summarized in tables and graphs.

Keywords: geopolymer, fiber filler, fly ash, compressive strength, fragility, composite material

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 6.1.2012

Podpis

## **Poděkování**

Na prvním místě bych rád poděkoval svým rodičům za podporu během mého studia na Technické univerzitě v Liberci.

Děkuji všem, kteří se jakýmkoli způsobem podíleli na vzniku této bakalářské práce. Jmenovitě paní doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. za odborné vedení při psaní této práce, panu Ing. Thang Nguyen Xiemovi nejen za pomoc při provedení zkoušky tlakem, ale i za ochotu kdykoli odpovědět na mé dotazy. Děkuji také slečně Ing. Trinh Thi Linh za pomoc při práci s vlákny.

Poděkování patří i všem členům katedry materiálu, kteří mi byli, během mého studia, vždy ochotni poskytnout radu.

## OBSAH

1	TEORETICKÁ ČÁST .....	10
1.1	Geopolymery .....	10
1.1.1	Úvod.....	10
1.1.2	Historie.....	10
1.1.3	Suroviny pro výrobu geopolymery .....	11
1.1.4	Vlastnosti a využití geopolymery .....	11
1.1.5	Geopolymer BAUCIS L160 .....	12
1.2	Vlákna.....	13
1.2.1	Čedičová vlákna.....	13
1.2.1.1	Obecně .....	13
1.2.1.2	Vlastnosti a využití čedičového vlákna.....	13
1.2.2	Uhlíková vlákna.....	14
1.2.2.1	Obecně .....	14
1.2.2.2	Vlastnosti a využití uhlíkového vlákna.....	15
1.2.3	Skelná vlákna typu E .....	16
1.2.3.1	Obecně .....	16
1.2.3.2	Vlastnosti a využití skelného vlákna typu E .....	17
1.2.4	Skelná vlákna Isover.....	17
1.2.4.1	Obecně .....	17
1.2.4.2	Vlastnosti a využití skelného vlákna Isover .....	18
1.3	Popílek .....	19
1.3.1	Obecně .....	19
1.3.2	Vlastnosti a využití popílků .....	19
1.3.3	Popílek s označením PRT .....	19
1.4	Kompozitní materiály .....	20
1.4.1	Definice kompozitních materiálů.....	20
1.4.2	Požadavky na kompozity .....	20
1.4.3	Synergický efekt .....	20

1.4.4 Vlákná v kompozitech .....	21
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	22
2.1 Zkouška pevnosti v tlaku .....	22
2.2 Zkušební vzorky .....	22
2.2.1 Složení zkušebních vzorků .....	22
2.2.2 Geometrická úprava vzorků .....	23
2.2.3 Pracovní postup .....	24
2.3 Naměřené a vypočtené hodnoty .....	25
2.3.1 Obsah kruhové plochy průřezu vzorku .....	25
2.3.2 Objem vzorku .....	25
2.3.3 Hustota .....	25
2.3.4 Mez pevnosti .....	26
2.3.5 Směrodatná odchylka .....	26
2.3.6 Vzorky „A“ – čistý geopolymér (Baucis L160) .....	27
2.3.7 Vzorky „B“ – geopolymér + 30% popílek PRT .....	28
2.3.8 Vzorky „C“ – geopolymér + 0,5% čedičové vlákno .....	29
2.3.9 Vzorky „D“ – geopolymér + 2% čedičové vlákno .....	30
2.3.10 Vzorky „E“ – geopolymér + 30% popílek PRT + 0,5% čedičové vlákno .....	31
2.3.11 Vzorky „F“ – geopolymér + 30% popílek PRT + 2% čedičové vlákno .....	32
2.3.12 Vzorky „G“ – geopolymér + 0,5% uhlíkové vlákno .....	33
2.3.13 Vzorky „H“ – geopolymér + 2% uhlíkové vlákno .....	34
2.3.14 Vzorky „I“ – geopolymér + 30% popílek PRT + 0,5% uhlíkové vlákno .....	35
2.3.15 Vzorky „J“ – geopolymér + 30% popílek PRT + 2% uhlíkové vlákno .....	36
2.3.16 Vzorky „K“ – geopolymér + 0,5% Isover .....	37
2.3.17 Vzorky „L“ – geopolymér + 2% Isover .....	38
2.3.18 Vzorky „M“ – geopolymér + 30% popílek PRT + 0,5% Isover .....	39



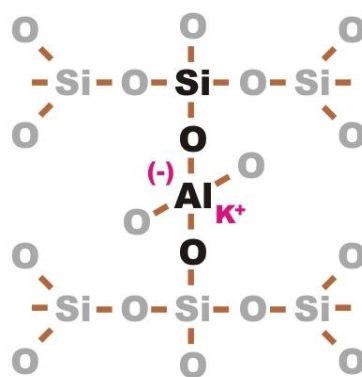
2.3.19	Vzorky „N“ – geopolymer + 30% popílek PRT + 2% Isover .....	40
2.3.20	Vzorky „O“ – geopolymer + 0,5% E-glass .....	41
2.3.21	Vzorky „P“ – geopolymer + 2% E-glass .....	42
2.3.22	Vzorky „Q“ – geopolymer + 30% popílek PRT + 0,5% E-glass.....	43
2.3.23	Vzorky „R“ – geopolymer + 30% popílek PRT + 2% E-glass.....	44
2.3.24	Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + čedičové vlákno.....	45
2.3.25	Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + PRT + čedičové vlákno .....	45
2.3.26	Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + uhlíkové vlákno .....	45
2.3.27	Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + PRT + uhlíkové vlákno .....	46
2.3.28	Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + Isover .....	46
2.3.29	Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + PRT + Isover .....	46
2.3.30	Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + E-glass .....	47
2.3.31	Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + PRT + E-glass .....	47
2.3.32	Průměrné hodnoty pevnosti – seřazeno .....	47
2.3.33	Průměrné hodnoty pevnosti – procentuální obsah vláken .....	48
2.3.34	Průměrné hodnoty pevnosti – popílek PRT .....	48
2.3.35	Průměrné hodnoty pevnosti – typ vláken .....	48
2.3.36	Křehkost vzorků.....	49
3	HODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	50
4	ZÁVĚR .....	51
5	POUŽITÁ LITERATURA .....	52

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Geopolymery

### 1.1.1 Úvod

Geopolymerem nazýváme materiál, který vzniká reakcí aluminosilikátových látek v zásaditém prostředí za normálního tlaku a teploty. Základním pojícím stavebním prvkem chemických řetězců těchto materiálů jsou sloučeniny hliníku a křemíku ( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$ ). Řetězce z minerálních molekul jsou spojeny kovalentními vazbami. [1]



Obr. 1 – příklad struktury geopolymery

Prvním krokem geopolymeryce je rozpuštění aluminosilikátu a jeho převedení do roztoku. [2] Každý kyslík v následujících molekulárních jednotkách vzniká v důsledku polykondenzace a tetraedrálně váže sousední Si a Al. Na základě odlišných poměrů atomů křemíku a hliníku rozlišujeme jednotlivé typy geopolymery:

	$(-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-)$	poly (siloxo)
Si:Al = 1	$(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-)$	poly (siláty)
Si:Al = 2	$(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-)$	poly (sialáty-siloxo)
Si:Al = 3	$(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-)$	poly (sialáty-disiloxo) [1] [3]

### 1.1.2 Historie

Pojem „geopolymer“ poprvé použil francouzský chemik, profesor Dr. Joseph Davidovits, v roce 1974 na egyptologickém kongresu v Lyonu, kde také světu představil zcela novou hypotézu o způsobu stavby pyramid na základě výroby umělého kamene.

Podle této teorie lidstvo, na různé úrovni, pracuje s geopolimery již zhruba 5000 let. Problematické rozlišení umělého a přírodního kamene, a též skutečnost, že Egypťané neměli k dispozici potřebné stavební mechanismy nebo vynález kola, vede francouzského chemika k přesvědčení, že jednotlivé kvádry těchto staveb se odlévaly do forem až na jejich místě. V jeho prospěch hovoří fakt, že při analýze kvádrů v nich byly zjištěny vzduchové bubliny a voda, s čímž se u přírodních kamenů nesetkáme. V kvádru Cheopsovy pyramidy v Gíze dokonce údajně objevil lidské vlasy a též rozdíl mezi hustotou kvádrů v jeho vrchní a spodní částí, která směrem vzhůru klesá, mluví ve prospěch této teorie. Davidovitsova hypotéza přesto doposud nebyla oficiálně s jistotou prokázána. Je však potvrzeno, že stavební materiál na bázi geopolimeru se používal i ve starověkém Řecku a v Mezopotámii. [4] V souvislosti s těmito materiály se setkáváme i se jménem ukrajinského vědce, profesora V. D. Gluchovského, který už v roce 1958 jako první popsal principy alkalické aktivace kaolinitických látek, popílků a strusek. [5]

### 1.1.3 Suroviny pro výrobu geopolimeru

Suroviny pro přípravu geopolimerů mohou být převážně látky odpadního charakteru, jako jsou elektrárenské popílků, strusky z metalurgických procesů, ale i jiné anorganické odpady nebo přírodní materiály, tedy jíly, kaolíny, aj. [6] Obecně vhodnými surovinami jsou ty materiály, které se vyznačují latentními hydraulickými vlastnostmi. Do této skupiny spadají materiály přírodního nebo syntetického původu, například aktivované kaolinické hlíny, nejčastěji metakaolin, popílků, vysokopecní struska nebo jejich směsi. Nejčastější je, díky jeho dostupnosti, právě využívání metakaolinu. Reaktivita metakaolinu je závislá na kalcinační teplotě, která se pohybuje optimálně okolo 700 °C. Další klíčovou složkou geopolymerní reakce jsou alkalické aktivátory, které zásadně ovlivňují pevnost a vlastnosti vzniklého produktu. Mezi aktivátory náleží alkalické roztoky sodíku a draslíku – hydroxidy, uhličitany (soda nebo potaš) a vodní sklo, a to samostatně nebo ve směsi. Díky svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem, které geopolimery mají, jsou schopny využít odpadní suroviny obsahující, jak křemík tak i hliník. [1]

### 1.1.4 Vlastnosti a využití geopolimerů

Geopolimery, svými vlastnostmi, stojí na rozhraní mezi klasickými hydratovanými anorganickými pojivy, skelnými a keramickými materiály. Vedle vysoké pevnosti, odolnosti vůči kyselým dešťům, ohni, vysokým teplotám, jsou tyto materiály často zmiňovány v souvislosti s jejich ekologičností. Základním pilířem tohoto hlediska je

možnost recyklace anorganických odpadů a snížení emisí CO<sub>2</sub> při výrobě geopolymery, které mohou být až o 90% nižší, než při výrobě portlandského cementu. Mezi důležité vlastnosti geopolymery patří i fixace toxických a radioaktivních odpadů a látek, které by právě například u cementu nedovolily proces jeho vytvrzování. Výhodou je též využití geopolymerních matric ve velmi širokém spektru kompozitních materiálů. [5] [7] Dále se využívají jako stavební materiál, izolace, k výstavbě silnic, protihlukových stěn, mostů, budov a jiných, původně betonových staveb. [4]

#### **1.1.5 Geopolymer BAUCIS L160**

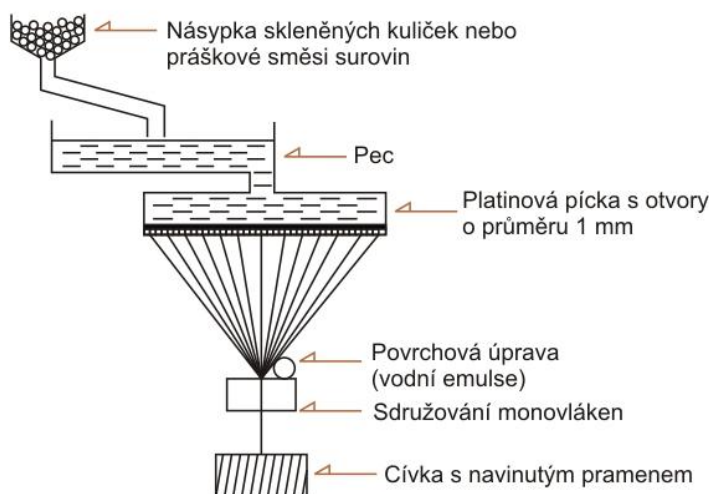
Baucis pojivo, které je vyráběno Českými lupkovými závody a.s., vyniká vysoce rychlým tvrdnutím: 40-50% konečné pevnosti je dosaženo za 1 den a 90% pevnosti během 7-14 dnů tvrzení při pokojové teplotě. Toto pojivo neobsahuje hydratační vodu a nemůže v ohni explodovat, je využitelné ve spojení s žáruvzdornými plnivými jako lupek a může být vystaveno teplotám až do 1200°C. Dle označení lze rozlišit série s různou počáteční (80-160 minut) a konečnou dobou tuhnutí (2-4 hodiny), tvořící produkty s fixními mechanickými vlastnostmi. [21]

## 1.2 Vlákn

### 1.2.1 Čedičová vlákn

#### 1.2.1.1 Obecně

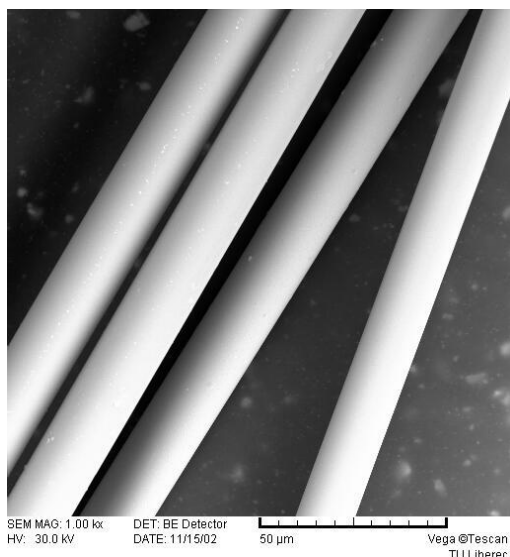
První zmínka pochází z roku 1923, kdy Paul Dhé z Paříže přišel s nápadem zvlákňování čediče. Většího rozmachu se ale čedičová vlákn dočkala až v šedesátých letech, kdy USA i SSSR hledaly uplatnění těchto vláken zejména ve vojenském průmyslu. Technologie výroby kontinuálních čedičových vláken je podobná výrobě skleněných vláken. [13] Čedičová hornina je roztavena v pícce a proud taveniny je protlačován skrz platinové trysky (průměr cca 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vláken je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování monovláken. Navíjecí rychlost je několik tisíc m/min. [10]



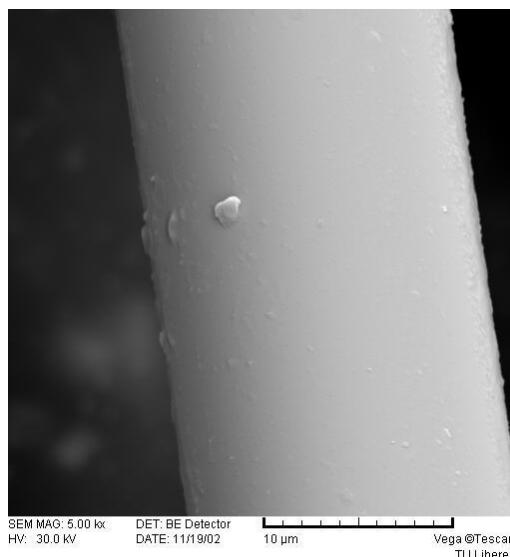
Obr. 2 – výroba skelného vlákn

#### 1.2.1.2 Vlastnosti a využití čedičového vlákn

Tato vlákn mají větší pevnost v tahu a větší modul pružnosti v tahu než standardní vlákn z E skla. Výhodou je jejich cena a dobrá chemická odolnost. Výroba a likvidace čedičových vláken, oproti vláknům obdobným je k životnímu prostředí velice šetrná, což je velkou výhodou. Čedičová vlákn jsou přírodním materiálem, který se dále zpracovává bez dalších přísad, a proto jsou snadněji recyklovatelná. Je zde i menší zdravotní riziko při zpracovávání a používání, tedy nejsou karcinogenní ani fibrogenní a jelikož se tato vlákn vyrábějí s minimálním průměrem 9  $\mu\text{m}$ , není možné je vdechnout. [8]



Obr. 3 – čedičová vlákna [9]



Obr. 4 – čedičové vlákno [9]

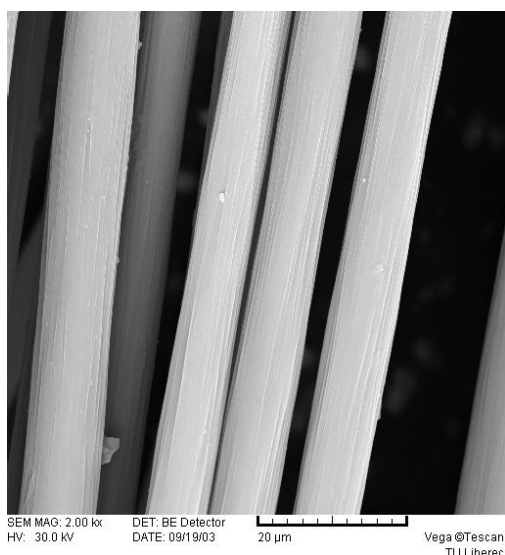
Tab. 1 - Vlastnosti čedičového vlákna [10]

Pracovní teplota pro tepelné izolace [°C]	820
Minimální teplota použití [°C]	-260
Teplota tavení [°C]	1450
Teplota skelného přechodu [°C]	1050
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	2750
Pevnost v tahu [MPa]	4840
Modul pružnosti E [GPa]	89
Prodloužení při přetržení [%]	3,15
Součinitel délkové teplotní roztažnosti 10 <sup>-6</sup> [1/K]	5,5

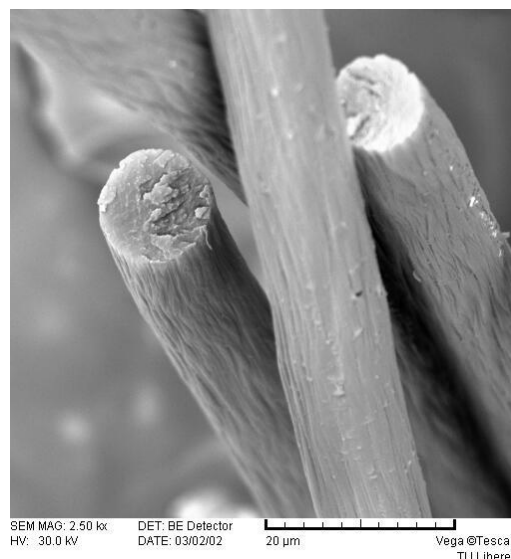
## 1.2.2 Uhlíková vlákna

### 1.2.2.1 Obecně

Počátek problematiky uhlíkových vláken se datuje do roku 1879, kdy T. A. Edison patentoval výrobu uhlíkových vláken vhodných pro použití v elektrických lampách. Nicméně, úspěšná komerční výroba začíná až roku 1960 v souvislosti s leteckým průmyslem, zejména vojenským. [10]



Obr. 6 – uhlíková vlákna [9]



Obr. 7 – uhlíková vlákna [9]

### 1.2.2.2 Vlastnosti a využití uhlíkového vlákna

Uhlíková vlákna jsou velmi pevná, mají vysokou odolnost vůči chemikáliím a jsou nehořlavá. V grafitovém krystalu, ve směru kolmém k bazálním rovinám šesterečné mřížky, působí jen slabé Van der Waalsovy vazby, kdežto v rovinách bazálních vrstev, v tzv. „aromatických“ rovinách, jsou atomy vázány velmi pevnými kovalentními vazbami. Tato vlákna mají nejširší spektrum mechanických vlastností při poměrně malé hustotě (1,8-2 g/cm<sup>3</sup>). Mezi negativní vlastnosti bychom mohli zařadit fakt, že uhlík ve styku s méně ušlechtilými kovy vytváří galvanický člunek a dochází tedy k elektrochemické korozi, při níž koroduje kov. Kompozit s uhlíkovými vlákny musí být proto od kovu oddělen nevodivým materiálem (například kompozitem se skleněnými vlákny). Dnes se vyrábějí převážně z vláken polyakrylonitrilových (PAN) a nejnověji z vláken novoloidu – vláken fenol-aldehydových. [10]

Tab. 2 - Vlastnosti uhlíkového vlákna (PAN) [10]

Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1800 - 2000
Pevnost v tahu [MPa]	1500 - 3000
Modul pružnosti E [GPa]	150 - 300
Prodloužení při přetržení [%]	1,0 – 1,5

Uhlíková vlákna se používají výhradně pro technické účely a naprostá většina z nich se uplatňuje jako výztuž kompozitů. Pro své vlastnosti jsou nejvíce využívána v leteckém a

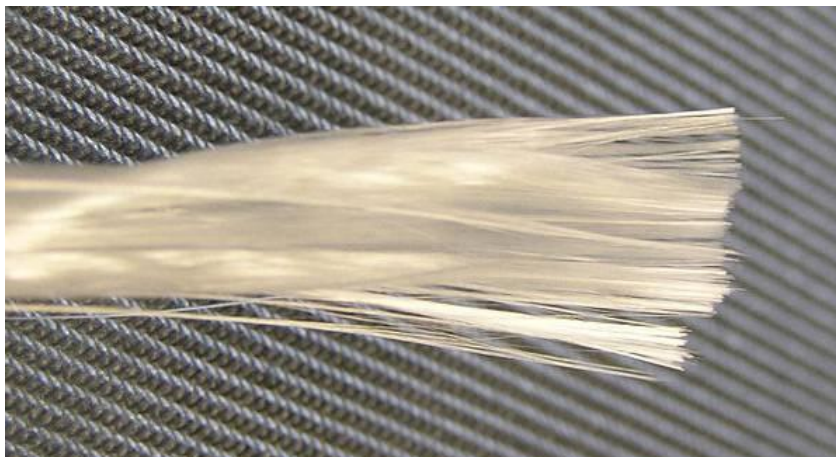
automobilovém průmyslu, ale také například k výrobě prvků sportovního náčiní, u něhož je nízká hmotnost a vysoká pevnost vyžadována. [12]

### **1.2.3 Skelná vlákna typu E**

#### **1.2.3.1 Obecně**

Výroba skla byla známa již Egypťanům okolo roku 1800 př. n. l. a můžeme s jistotou tvrdit, že první výrobci skla znali i skleněná vlákna, která dokázali snadno vytáhnout z roztavené skloviny. Egyptské vázy okolo roku 1600 př. n. l. byly již zdobeny hrubými skleněnými vlákny. Archeologické nálezy v Číně (dynastie Han 206 let př. n. l. až 220 let n.l.) obsahovaly tlustá skleněná vlákna o složení obdobném současnému E - sklu. Laboratorní výrobu a technické použití skleněných vláken uvádějí ve svých pracích zakladatelé moderní fyziky Hooke a Réaumur (17. až počátek 18. století) a koncem 19. stol. se objevují první zmínky o technickém využití skleněného vlákna v patentové literatuře. Roku 1934 jsou poprvé průmyslově vyráběna tepelně-izolační skleněná vlákna v Newarku (Ohio, USA). [14]





Obr. 7 – skelná vlákna typu E [9]

### 1.2.3.2 Vlastnosti a využití skelného vlákna typu E

Ceněná jsou hlavně pro svoje výborné technické vlastnosti jako jsou vysoká pevnost, odolnost vůči vysokým teplotám, nehořlavost, dobrá chemická odolnost a dobré elektrické vlastnosti. Vynikajících tepelně a zvukově izolačních vlastností využívá v široké míře stavební průmysl. [14]

Tab. 3 - Vlastnosti skelného vlákna typu E [10]

Pracovní teplota pro tepelné izolace [°C]	600
Minimální teplota použití [°C]	-60
Teplota tavení [°C]	1400
Teplota skelného přechodu [°C]	825
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	2600
Pevnost v tahu [MPa]	3450
Modul pružnosti E [GPa]	77
Prodloužení při přetržení [%]	4,7
Součinitel délkové teplotní roztažnosti 10-6 [1/K]	5

### 1.2.4 Skelná vlákna Isover

#### 1.2.4.1 Obecně

Společnost Saint-Gobain Isover vyvíjí a vyrábí kompletní sortiment materiálů z minerálních vláken. Saint Gobain byla založena ve Francii v roce 1665 za vlády Ludvíka XIV bankéřem Jean Baptiste Colbertem za účelem výroby skla pro slavný zrcadlový sál na zámku ve Versailles. Dnes je jednou ze sta největších skupin světa. [15]

#### **1.2.4.2 Vlastnosti a využití skelného vlákna Isover**

Tato skelná vlákna se ve formě skelné plsti využívají jako tepelná izolace ve stavebnictví. Společným znakem všech izolačních výrobků z těchto minerálních vláken je jejich velmi dobrá i zvukově izolační účinnost a vysoká požární odolnost. [15]



*Obr. 8 – skelná vata Isover [17]*

### 1.3 Popílek

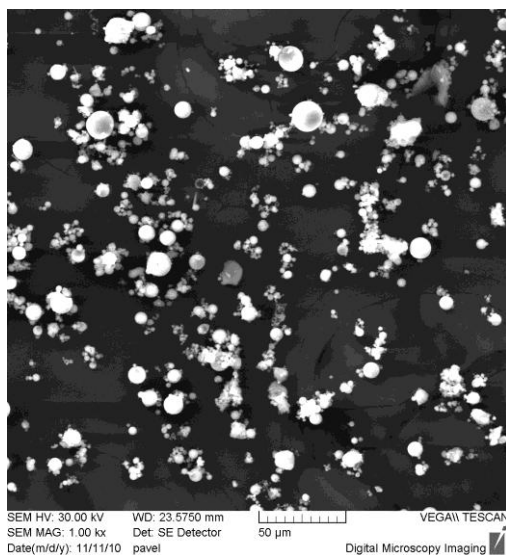
#### 1.3.1 Obecně

Popílek vzniká jako vedlejší produkt při spalování uhlí v elektrárenských a teplárenských kotlích. Rozměry jednotlivých částic popílku se pohybují v rozmezí od 0 do 1000  $\mu\text{m}$  a obsah nedopalu nepřesahuje 1%. Jedná se o chemicky inertní materiál, skládající se především z  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . [18]

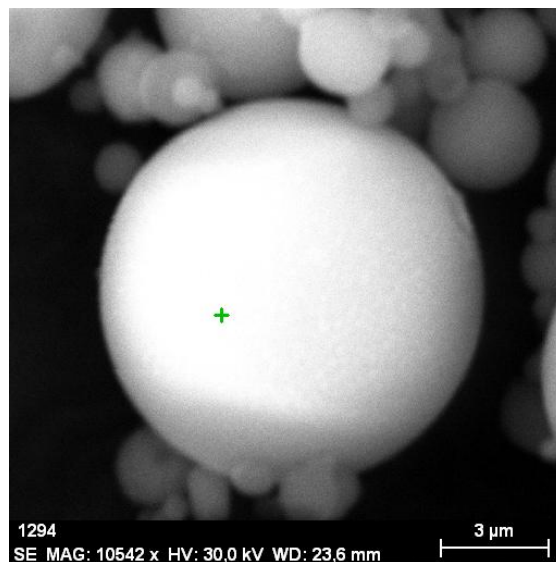
#### 1.3.2 Vlastnosti a využití popílků

Pokud popílek splňuje určité normy, získá certifikaci a je jej možno využívat i jako aktivní příměs do betonu a pro výrobu cementu. Nalézají tedy široké uplatnění při výrobě stavebních hmot, přičemž mohou působit nejen jako aktivní, ale i jako neaktivní složka. Jedná-li se o aktivní složku, přispívá takový popílek k procesu tvrdnutí. Pokud jde o neaktivní složku, je zde pouze jako plnivo, které při vytvrzení nehraje žádnou roli. [18]

#### 1.3.3 Popílek s označením PRT



Obr. 9 – popílek PRT [19]



Obr. 10 – popílek PRT [20]

Tab. 4 - Chemické složení popílku PRT [20]

Prvek	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	As
Atomární obsah [%]	55,06	0,77	1,17	10,89	25,17	1,70	0,93	0,53	3,68	0,10

## 1.4 Kompozitní materiály

### 1.4.1 Definice kompozitních materiálů

Definice formulovaná ve spolupráci NASA a amerických vojenských vývojových center: „Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“ [16]

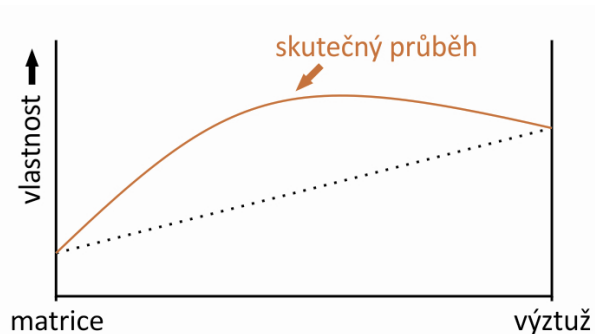
Definice G. F. Milтона, zavedená v knize Theory of Composites: „Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní.“ [16]

### 1.4.2 Požadavky na kompozity

Vytváření nových kompozitních materiálů má za účel splnění některých požadavků, které u klasických materiálů jsou jen těžko splnitelné. Jde například o tyto požadavky: zvýšení pevnosti, tuhosti, houževnatosti, teplotní stability, korozní a chemické odolnosti, nebo třeba i snížení ceny. [16] Dále se materiály třídí na základě geometrie vyztužení na částicové kompozity a vláknové kompozity. [1]

### 1.4.3 Synergický efekt

Jedná se o efekt, kdy dochází v kompozitu ke kombinaci vlastností složek tak, že celek přesahuje poměrný součet složek. Schematicky to znázorňuje následující diagram. [16]



Obr. 11 – synergický efekt v kompozitním materiálu

#### **1.4.4 Vlákná v kompozitech**

V kompozitech se používají nejrůznější druhy vláken, která v zásadě můžeme roztřídit na vlákna přírodní, skleněná, uhlíková a grafitová, aramidová a silonová, keramická, kovová a whiskery. Průřez vláken je zpravidla kruhový. Vlákná silně zvyšují pevnost v tahu a tuhost ve směru vláken, zatímco v ostatních směrech je jejich účinek daleko slabší. Podle jejich tvaru se dělí na vlákna spojitá (nejsou uvnitř kompozitu přerušena), dlouhá (jsou delší než kritická délka, při lomu se přetrhnou) a krátká (jsou kratší než kritická délka, při lomu se vytáhnou). Další dělení je závislé na uspořádání vláken v kompozitu. V případě rovinného uspořádání se jedná buď o jednoosé, nebo dvojosé uspořádání a v případě dlouhých a krátkých vláken i o trojosé, při němž je vlákno náhodně rozloženo a orientováno v prostoru. [16]

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2.1 Zkouška pevnosti v tlaku

Jedná se o destruktivní zkoušku pro zjištění pevnosti materiálu. Pro tento experiment byla zvolena válcová pevnost, kde výška válce je dvojnásobkem jeho průměru. Zkušební válec se vloží mezi tlačné desky lisu výškou ve směru působení tlaku.



*Obr. 12 – vzorek ve zkušebním zařízení*

### 2.2 Zkušební vzorky

Coby zkušebních vzorků, bylo použito válečků o průměru 28 mm. Výšky vzorků se pohybují v rozmezí přibližně od 50 do 56 mm (přesné hodnoty zapsány v tabulkách s výsledky měření) v závislosti na broušení nutném pro jejich geometrickou přesnost.

#### 2.2.1 Složení zkušebních vzorků

Jednotlivé vzorky jsou označeny podle abecedy písmenem (A až R) pro každý druh směsi. Vzorky testované po 7 dnech jsou označeny čísly 1 až 5, po 14 dnech čísly 6 až 10 a po 28 dnech čísly 11 až 15. Geopolymer Baucis L160 se míchá v poměru 5 dílů cementu na 4 díly aktivátoru.

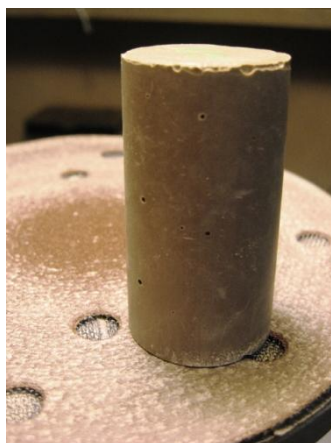
Složení jednotlivých směsí:

A: čistý geopolymer

- B: geopolymer + 30% popílek PRT
- C: geopolymer + 0,5% čedičové vlákno
- D: geopolymer + 2,0% čedičové vlákno
- E: geopolymer + 30% popílek PRT + 0,5% čedičové vlákno
- F: geopolymer + 30% popílek PRT + 2,0% čedičové vlákno
- G: geopolymer + 0,5% uhlíkové vlákno
- H: geopolymer + 2,0% uhlíkové vlákno
- I: geopolymer + 30% popílek PRT + 0,5% uhlíkové vlákno
- J: geopolymer + 30% popílek PRT + 2,0% uhlíkové vlákno
- K: geopolymer + 0,5% Isover
- L: geopolymer + 2,0% Isover
- M: geopolymer + 30% popílek PRT + 0,5% Isover
- N: geopolymer + 30% popílek PRT + 2,0% Isover
- O: geopolymer + 0,5% E-glass
- P: geopolymer + 2,0% E-glass
- Q: geopolymer + 30% popílek PRT + 0,5% E-glass
- R: geopolymer + 30% popílek PRT + 2,0% E-glass

### 2.2.2 Geometrická úprava vzorků

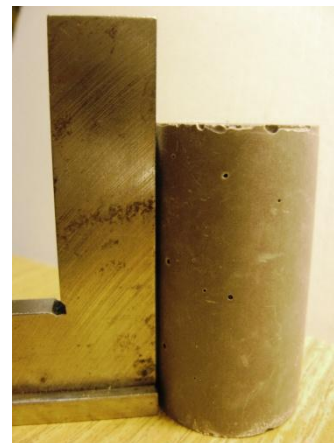
Vzorky bylo nutné po vyjmutí z forem upravit. Každý vzorek byl nejprve nahrubo broušen na rotačním kotouči s brusným papírem o zrnitosti 60, a poté na rovné desce s brusným papírem o zrnitosti 80. V této druhé fázi byl každý vzorek průběžně měřen a kontrolován kvůli rovnoběžnosti podstav a jejich kolmosti k ose válečku.



Obr. 13 – broušení (z.60)



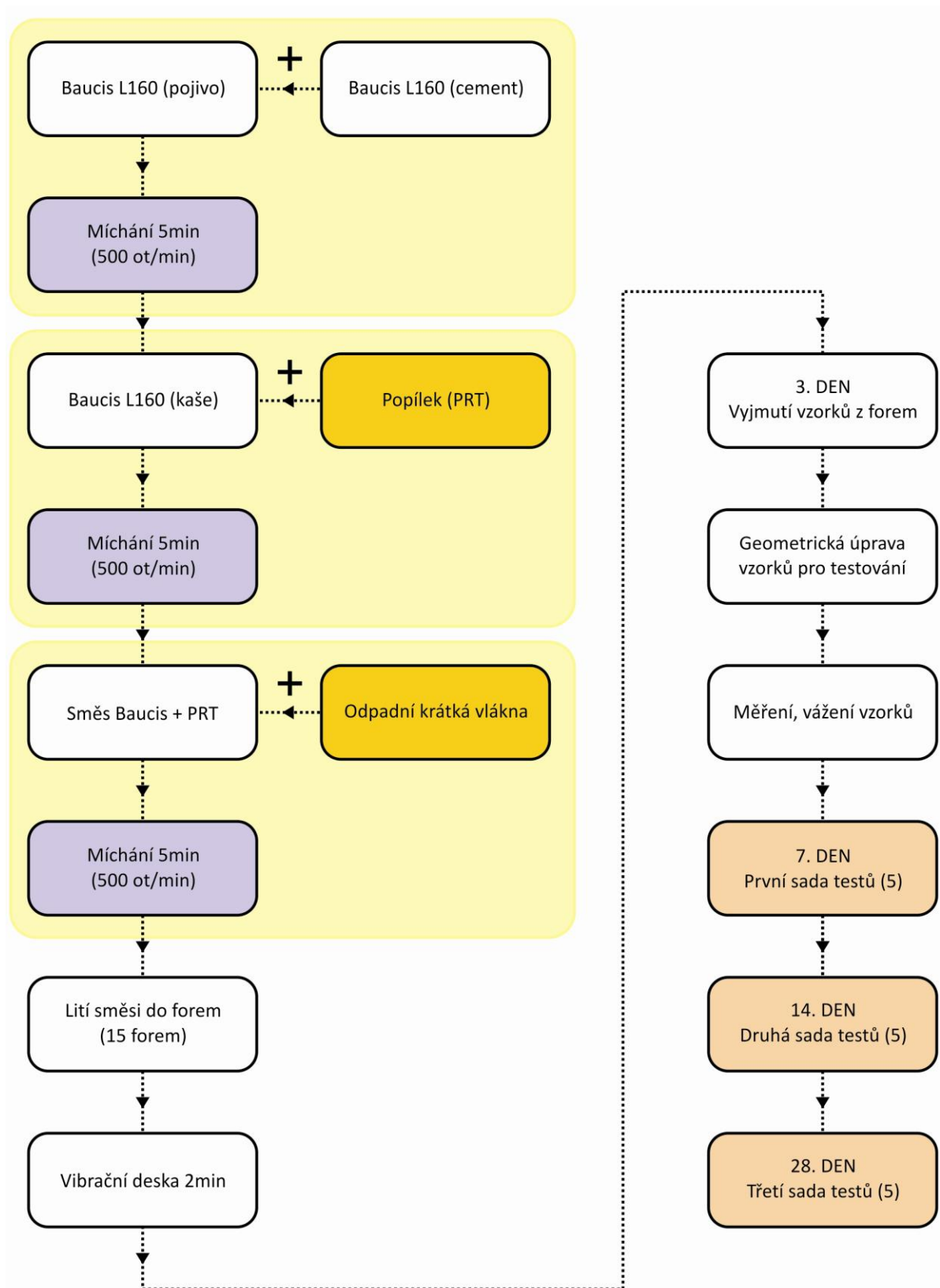
Obr. 14 – broušení (z.80)



Obr. 15 – kontrola vzorku



### 2.2.3 Pracovní postup





## 2.3 Naměřené a vypočtené hodnoty

### 2.3.1 Obsah kruhové plochy průřezu vzorku

$$d = 28 \text{ mm}$$

$$S = ? [\text{mm}^2]$$

$$S = \pi \cdot d^2 / 4 \quad (1)$$

$$S = \pi \cdot 28^2 / 4$$

$$\underline{\underline{S = 615,75 \text{ mm}^2}}$$

kde je:

d ... průměr vzorku [mm]

S ... obsah kruhové plochy průřezu vzorku [mm<sup>2</sup>]

### 2.3.2 Objem vzorku

Objem každého vzorku byl počítán pro zjištění hustoty vzorku. Vyplývá ze vztahu:

$$V = S \cdot v \quad (2)$$

kde je:

V ... objem [m<sup>3</sup>]

S ... obsah kruhové plochy průřezu vzorku [m<sup>2</sup>]

v ... výška válečku [m]

### 2.3.3 Hustota

Hustota každého vzorku byla počítána z důvodu případné teoretické nehomogenity (vzniklé přítomností bublin ve vzorku), která by mohla mít negativní vliv na výsledek zkoušky. Hustota je počítána vztahem:

$$\rho = m / V \quad (3)$$

kde je:

$\rho$  ... hustota [kg.m<sup>-3</sup>]

m ... hmotnost [kg]

V ... objem [m<sup>3</sup>]

### 2.3.4 Mez pevnosti

$$F_{\max} [\text{N}]$$

$$S = 615,75 \text{ mm}^2 = 0,00061575 \text{ m}^2$$

$$R = ? [\text{MPa}]$$

$$R = F_{\max} / S \quad (4)$$

kde je:

$F_{\max}$  ... maximální zatěžující síla [N]

$S$  ... obsah kruhové plochy průřezu vzorku [ $\text{m}^2$ ]

$R$  ... mez pevnosti [MPa]

### 2.3.5 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka je počítána metodou „n“, tedy metodou „tendenční“ a je definována následujícím vztahem:

$$\sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}} \quad (5)$$

kde je:

$x$  ... argumenty základního souboru

$n$  ... počet argumentů

### 2.3.6 Vzorky „A“ – čistý geopolymér (Baucis L160)

Tab. 5 - TEST (7dní)

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
A1	1879,17	52,36	60,512	23950	38,943
A2	1891,93	51,89	60,376	20380	33,138
A3	1898,30	53,95	62,975	21250	34,553
A4	1892,66	52,92	61,598	21020	34,179
A5	1907,78	54,12	63,498	19950	32,439

**Průměrná hodnota pevnosti: 34,65 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,27 Mpa**

Tab. 6 - TEST (14dní)

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
A6	1881,05	52,58	60,827	21880	35,577
A7	1882,38	52,65	60,951	26620	43,285
A8	1886,47	53,49	62,058	22150	36,016
A9	1854,93	54,17	61,796	26210	42,618
A10	1891,91	53,79	62,586	23980	38,992

**Průměrná hodnota pevnosti: 39,30 MPa**

**Směrodatná odchylka: 3,21 MPa**

Tab. 7 - TEST (28dní)

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
A11	1823,62	52,21	58,555	32080	52,163
A12	1827,69	56,05	63,002	34510	56,114
A13	1831,88	55,03	61,997	33170	53,935
A14	1821,12	53,00	59,362	29200	47,480
A15	1833,91	52,42	59,122	28120	45,724

**Průměrná hodnota pevnosti: 51,08 MPa**

**Směrodatná odchylka: 3,91 MPa**

### 2.3.7 Vzorky „B“ – geopolymery + 30% popílek PRT

Tab. 8 - TEST (7dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
B1	1882,12	51,90	60,077	20980	34,114
B2	1890,74	53,23	61,896	19750	32,114
B3	1898,89	53,48	62,455	19190	31,203
B4	1903,28	54,85	64,203	22470	36,537
B5	1899,16	53,94	63,001	21980	35,740

**Průměrná hodnota pevnosti: 33,94 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,04 MPa**

Tab. 9 - TEST (14dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
B6	1903,91	55,20	64,634	28690	46,650
B7	1896,30	52,58	61,320	28990	47,138
B8	1894,97	53,77	62,664	23550	38,293
B9	1915,26	55,89	65,832	27240	44,293
B10	1910,41	53,55	62,916	28360	46,114

**Průměrná hodnota pevnosti: 44,50 MPa**

**Směrodatná odchylka: 3,25 MPa**

Tab. 10 - TEST (28dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
B11	1852,30	53,75	61,230	30050	48,862
B12	1863,51	53,76	61,612	31560	51,317
B13	1864,81	55,04	63,123	33500	54,472
B14	1853,40	55,97	63,797	30900	50,244
B15	1868,03	54,12	62,175	29230	47,528

**Průměrná hodnota pevnosti: 50,48 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,37 MPa**

### 2.3.8 Vzorky „C“ – geopolymery + 0,5% čedičové vlákno

Tab. 11 - TEST (7dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
C1	1907,21	51,72	60,664	25000	40,650
C2	1882,90	50,43	58,397	27270	44,341
C3	1885,63	54,49	63,190	26320	42,797
C4	1889,16	51,04	59,300	26990	43,886
C5	1899,70	49,55	57,890	24010	39,041

**Průměrná hodnota pevnosti: 42,14 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,01 MPa**

Tab. 12 - TEST (14dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
C6	1887,61	52,33	60,749	28550	46,423
C7	1899,68	49,91	58,310	26530	43,138
C8	1866,74	54,51	62,580	30750	50,000
C9	1868,78	53,00	60,913	26100	42,439
C10	1889,13	55,05	63,958	27950	45,447

**Průměrná hodnota pevnosti: 45,49 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,69 MPa**

Tab. 13 - TEST (28dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
C11	1865,58	51,15	58,686	28750	46,748
C12	1899,56	53,70	62,734	33000	53,659
C13	1862,56	51,90	59,450	32820	53,366
C14	1901,78	48,28	56,468	28050	45,610
C15	1856,46	50,38	57,520	31250	50,813

**Průměrná hodnota pevnosti: 50,03 MPa**

**Směrodatná odchylka: 3,32 MPa**

### 2.3.9 Vzorky „D“ – geopolymery + 2% čedičové vlákno

Tab. 14 - TEST (7dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
D1	1787,60	52,77	58,014	20320	33,041
D2	1841,10	51,43	58,233	21150	34,390
D3	1849,49	49,04	55,780	21780	35,415
D4	1806,81	52,48	58,315	18010	29,285
D5	1750,31	51,54	55,480	16140	26,244

**Průměrná hodnota pevnosti: 31,68 MPa**

**Směrodatná odchylka: 3,42 MPa**

Tab. 15 - TEST (14dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
D6	1789,93	54,21	59,008	21130	34,358
D7	1806,41	55,75	61,935	24350	39,593
D8	1795,19	49,73	54,904	21600	35,122
D9	1806,39	53,98	59,968	24530	39,886
D10	1864,59	51,71	59,297	25010	40,667

**Průměrná hodnota pevnosti: 37,92 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,63 MPa**

Tab. 16 - TEST (28dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
D11	1782,69	50,45	55,311	25150	40,894
D12	1818,57	54,61	61,077	26210	42,618
D13	1793,64	55,62	61,354	25820	41,984
D14	1832,37	56,30	63,445	29490	47,951
D15	1839,14	55,32	62,571	26120	42,472

**Průměrná hodnota pevnosti: 43,18 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,46 MPa**

**2.3.10 Vzorky „E“ – geopolymery + 30% popílek PRT + 0,5% čedičové vlákno***Tab. 17 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
E1	1932,92	51,28	60,959	21690	35,270
E2	1940,62	53,37	63,696	24990	40,634
E3	1875,55	52,99	61,122	21640	35,187
E4	1899,39	53,11	62,039	27320	44,423
E5	1926,60	54,69	64,800	23630	38,423

**Průměrná hodnota pevnosti: 38,79 MPa****Směrodatná odchylka: 3,48 MPa***Tab. 18 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
E6	1862,72	54,68	62,640	24750	40,244
E7	1871,97	54,37	62,594	21560	35,057
E8	1881,66	54,91	63,543	23410	38,065
E9	1872,38	52,80	60,800	26450	43,008
E10	1873,18	54,34	62,600	25620	41,459

**Průměrná hodnota pevnosti: 40,24 MPa****Směrodatná odchylka: 2,77 MPa***Tab. 19 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
E11	1875,70	56,00	64,599	32020	52,065
E12	1889,81	55,48	64,481	31100	50,569
E13	1906,06	55,45	65,000	29550	48,049
E14	1920,98	55,55	65,627	28960	47,089
E15	1890,50	55,22	64,202	32800	53,333

**Průměrná hodnota pevnosti: 50,22 MPa****Směrodatná odchylka: 2,36 MPa**

**2.3.11 Vzorčky „F“ – geopolymery + 30% popílek PRT + 2% čedičové vlákno***Tab. 20 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
F1	1804,95	55,35	61,441	19680	32,000
F2	1783,20	53,46	58,628	18990	30,878
F3	1837,50	52,82	59,690	18990	30,878
F4	1823,63	53,54	60,047	20850	33,902
F5	1791,90	49,60	54,660	17000	27,642

**Průměrná hodnota pevnosti: 31,06 MPa****Směrodatná odchylka: 2,04 MPa***Tab. 21 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
F6	1760,19	51,93	56,215	20500	33,333
F7	1790,73	53,96	59,426	20050	32,602
F8	1781,84	55,93	61,290	22570	36,699
F9	1781,98	53,65	58,796	20590	33,480
F10	1784,82	49,68	54,532	18570	30,195

**Průměrná hodnota pevnosti: 33,26 MPa****Směrodatná odchylka: 2,08 MPa***Tab. 22 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
F11	1790,78	51,91	57,170	24750	40,244
F12	1797,59	53,45	59,090	26490	43,073
F13	1777,16	55,90	61,096	24940	40,553
F14	1783,60	55,38	60,747	24080	39,154
F15	1742,69	51,37	55,056	23830	38,748

**Průměrná hodnota pevnosti: 40,35 MPa****Směrodatná odchylka: 1,51 MPa**



**2.3.12 Vzorčky „G“ – geopolymery + 0,5% uhlíkové vlákno***Tab. 23 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
G1	1884,34	53,73	62,266	24000	39,024
G2	1854,43	55,00	62,726	25550	41,545
G3	1855,14	53,58	61,130	21550	35,041
G4	1853,57	53,02	60,440	25900	42,114
G5	1901,47	51,90	60,692	24870	40,439

**Průměrná hodnota pevnosti: 39,63 MPa****Směrodatná odchylka: 2,53 MPa***Tab. 24 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
G6	1825,43	54,55	61,240	27750	45,122
G7	1885,38	54,04	62,660	26010	42,293
G8	1821,09	54,03	60,512	25020	40,683
G9	1827,98	53,82	60,505	25590	41,610
G10	1887,20	52,83	61,316	28680	46,634

**Průměrná hodnota pevnosti: 43,27 MPa****Směrodatná odchylka: 2,24 MPa***Tab. 25 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
G11	1820,77	51,38	57,534	27650	44,959
G12	1842,20	52,41	59,378	29900	48,618
G13	1791,03	53,20	58,599	26410	42,943
G14	1807,19	52,54	58,394	28110	45,707
G15	1856,12	55,67	63,548	26200	42,602

**Průměrná hodnota pevnosti: 44,97 MPa****Směrodatná odchylka: 2,17 MPa**

### 2.3.13 Vzorčky „H“ – geopolymery + 2% uhlíkové vlákno

Tab. 26 - TEST (7dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
H1	1765,27	52,78	57,300	20060	32,618
H2	1747,52	56,22	60,421	18020	29,301
H3	1739,27	54,47	58,264	20040	32,585
H4	1750,86	55,29	59,535	21250	34,553
H5	1738,90	55,76	59,631	18780	30,537

**Průměrná hodnota pevnosti: 31,92 MPa**

**Směrodatná odchylka: 1,82 MPa**

Tab. 27 - TEST (14dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
H6	1725,70	50,42	53,511	20070	32,634
H7	1728,16	54,17	57,573	21040	34,211
H8	1690,07	52,95	55,036	21810	35,463
H9	1651,14	55,14	55,992	19960	32,455
H10	1748,74	51,09	54,946	21510	34,976

**Průměrná hodnota pevnosti: 33,95 MPa**

**Směrodatná odchylka: 1,21 MPa**

Tab. 28 - TEST (28dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
H11	1691,06	56,15	58,396	23140	37,626
H12	1760,11	57,22	61,939	25680	41,756
H13	1732,91	55,02	58,637	25800	41,951
H14	1689,76	55,12	57,281	21880	35,577
H15	1748,04	54,26	58,332	25320	41,171

**Průměrná hodnota pevnosti: 39,62 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,56 MPa**

**2.3.14 Vzorčky „I“ – geopolymery + 30% popílek PRT + 0,5% uhlíkové vlákno***Tab. 29 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
I1	1749,26	53,17	57,200	20280	32,976
I2	1869,90	56,63	65,124	23620	38,407
I3	1875,41	52,44	60,483	21230	34,520
I4	1861,50	56,33	64,488	20480	33,301
I5	1855,19	53,56	61,109	21220	34,504

**Průměrná hodnota pevnosti: 34,74 MPa****Směrodatná odchylka: 1,94 MPa***Tab. 30 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
I6	1856,68	53,25	60,804	23680	38,504
I7	1854,16	49,42	56,354	26250	42,683
I8	1849,33	55,94	63,623	23150	37,642
I9	1848,19	55,35	62,913	23770	38,650
I10	1845,90	54,25	61,586	24270	39,463

**Průměrná hodnota pevnosti: 39,39 MPa****Směrodatná odchylka: 1,75 MPa***Tab. 31 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
I11	1856,37	55,25	63,077	25250	41,057
I12	1835,87	51,89	58,587	23510	38,228
I13	1838,35	55,97	63,279	25900	42,114
I14	1839,21	56,57	63,987	23610	38,390
I15	1840,29	54,50	61,682	24160	39,285

**Průměrná hodnota pevnosti: 39,81 MPa****Směrodatná odchylka: 1,53 MPa**

**2.3.15 Vzorky „J“ – geopolymery + 30% popílek PRT + 2% uhlíkové vlákno***Tab. 32 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
J1	1533,58	54,30	51,213	13820	22,472
J2	1784,38	57,13	62,694	19410	31,561
J3	1759,48	50,28	54,407	18130	29,480
J4	1791,31	52,61	57,958	16380	26,634
J5	1687,08	55,20	57,273	15160	24,650

**Průměrná hodnota pevnosti: 26,96 MPa****Směrodatná odchylka: 3,26 MPa***Tab. 33 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
J6	1736,78	50,85	54,314	18814	30,592
J7	1821,84	56,77	63,607	23050	37,479
J8	1784,56	54,56	59,880	22010	35,789
J9	1781,64	53,61	58,741	21000	34,146
J10	1761,22	55,56	60,180	18590	30,227

**Průměrná hodnota pevnosti: 33,65 MPa****Směrodatná odchylka: 2,85 MPa***Tab. 34 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
J11	1713,04	56,02	59,018	20420	33,203
J12	1765,73	51,07	55,458	21350	34,715
J13	1742,61	53,22	57,036	20500	33,333
J14	1757,87	55,10	59,568	22950	37,317
J15	1710,10	48,27	50,766	22170	36,049

**Průměrná hodnota pevnosti: 34,92 MPa****Směrodatná odchylka: 1,58 MPa**

**2.3.16 Vzorčky „K“ – geopolymery + 0,5% Isover***Tab. 35 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
K1	1882,28	52,01	60,207	16750	27,236
K2	1878,37	52,61	60,775	15780	25,659
K3	1920,52	54,08	63,875	16500	26,829
K4	1913,52	52,58	61,877	17430	28,341
K5	1910,76	53,45	62,810	21120	34,341

**Průměrná hodnota pevnosti: 28,48 MPa****Směrodatná odchylka: 3,05 MPa***Tab. 36 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
K6	1819,26	53,49	59,847	20000	32,520
K7	1826,76	53,37	59,959	22510	36,602
K8	1776,71	51,61	56,393	22030	35,821
K9	1816,94	50,92	56,899	18350	29,837
K10	1844,52	52,04	59,033	18000	29,268

**Průměrná hodnota pevnosti: 32,81 MPa****Směrodatná odchylka: 3,00 MPa***Tab. 37 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
K11	1770,32	51,90	56,506	22770	37,024
K12	1764,78	52,10	56,450	21820	35,480
K13	1779,58	53,09	58,104	23400	38,049
K14	1787,31	53,55	58,862	24490	39,821
K15	1796,54	50,05	55,299	23500	38,211

**Průměrná hodnota pevnosti: 37,72 MPa****Směrodatná odchylka: 1,43 MPa**

**2.3.17 Vzorčky „L“ – geopolymery + 2% Isover***Tab. 38 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
L1	1845,22	53,58	60,803	20980	34,114
L2	1842,25	53,15	60,218	20620	33,528
L3	1864,74	52,33	60,013	20490	33,317
L4	1804,25	57,64	63,958	19010	30,911
L5	1844,71	55,57	63,044	23590	38,358

**Průměrná hodnota pevnosti: 34,05 MPa****Směrodatná odchylka: 2,42 MPa***Tab. 39 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
L6	1793,02	53,51	59,006	23650	38,455
L7	1823,64	52,60	58,993	22070	35,886
L8	1777,68	54,11	59,157	20500	33,333
L9	1781,70	53,35	58,458	22490	36,569
L10	1776,59	55,31	60,432	22000	35,772

**Průměrná hodnota pevnosti: 36,00 MPa****Směrodatná odchylka: 1,64 MPa***Tab. 40 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
L11	1758,40	52,30	56,558	24700	40,163
L12	1735,05	52,15	55,647	23750	38,618
L13	1749,91	50,53	54,380	19700	32,033
L14	1720,59	54,09	57,236	23930	38,911
L15	1760,53	54,30	58,792	19150	31,138

**Průměrná hodnota pevnosti: 36,17 MPa****Směrodatná odchylka: 3,79 MPa**

**2.3.18 Vzorčky „M“ – geopolymery + 30% popílek PRT + 0,5% Isover***Tab. 41 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
M1	1917,23	55,20	65,086	17880	29,073
M2	1845,48	56,85	64,523	13770	30,520
M3	1845,35	53,77	61,023	18320	29,789
M4	1847,57	54,81	62,278	15780	25,659
M5	1872,75	53,79	61,952	18890	30,715

**Průměrná hodnota pevnosti: 29,15 MPa****Směrodatná odchylka: 1,84 MPa***Tab. 42 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
M6	1781,91	55,00	60,273	20030	32,569
M7	1844,02	53,39	60,548	21850	35,528
M8	1803,16	52,87	58,630	18890	30,715
M9	1791,04	52,40	57,718	19400	34,545
M10	1800,41	53,38	59,105	20420	33,203

**Průměrná hodnota pevnosti: 33,31 MPa****Směrodatná odchylka: 1,66 MPa***Tab. 43 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
M11	1723,64	53,30	56,500	23750	38,618
M12	1795,12	53,53	59,097	25200	40,976
M13	1719,88	53,18	56,250	22810	37,089
M14	1781,00	52,65	56,697	19700	32,033
M15	1729,84	53,70	57,129	22540	36,650

**Průměrná hodnota pevnosti: 37,07 MPa****Směrodatná odchylka: 2,94 MPa**

**2.3.19 Vzorky „N“ – geopolymery + 30% popílek PRT + 2% Isover***Tab. 44 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
N1	1839,53	55,70	63,014	18680	30,374
N2	1831,18	52,80	59,462	18790	30,553
N3	1863,81	53,80	61,668	19490	31,691
N4	1901,72	52,72	61,659	20380	33,138
N5	1848,38	54,25	61,669	18280	29,724

**Průměrná hodnota pevnosti: 31,10 MPa****Směrodatná odchylka: 1,20 MPa***Tab. 45 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
N6	1822,65	54,32	60,889	19650	31,951
N7	1796,74	53,28	58,874	22350	36,341
N8	1836,88	54,65	61,737	20050	32,602
N9	1827,41	56,00	62,936	21920	35,642
N10	1802,47	55,05	61,024	19500	31,707

**Průměrná hodnota pevnosti: 33,65 MPa****Směrodatná odchylka: 1,95 MPa***Tab. 46 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
N11	1819,95	56,36	63,082	22160	36,033
N12	1831,01	54,28	61,123	21250	34,553
N13	1812,59	54,00	60,196	20690	33,642
N14	1821,34	55,71	62,402	22820	37,106
N15	1829,22	52,14	58,656	18100	29,431

**Průměrná hodnota pevnosti: 34,15 MPa****Směrodatná odchylka: 2,64 MPa**



**2.3.20 Vzorčky „O“ – geopolymery + 0,5% E-glass***Tab. 47 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
O1	1773,15	53,41	58,243	23200	37,724
O2	1835,62	55,70	62,880	25250	41,057
O3	1838,72	52,48	59,345	26460	43,024
O4	1838,81	52,80	59,710	22900	37,236
O5	1849,42	51,32	58,371	27500	44,715

**Průměrná hodnota pevnosti: 40,75 MPa****Směrodatná odchylka: 2,92 MPa***Tab. 48 - TEST (14dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
O6	1806,97	51,65	57,398	26650	43,333
O7	1788,13	53,02	58,306	29450	47,886
O8	1785,18	50,64	55,597	26390	42,911
O9	1775,96	53,81	58,772	25170	40,927
O10	1811,04	51,56	57,427	28050	45,610

**Průměrná hodnota pevnosti: 44,13 MPa****Směrodatná odchylka: 2,39 MPa***Tab. 49 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
O11	1698,99	53,59	55,995	28320	46,049
O12	1713,85	53,41	56,295	27330	44,439
O13	1699,15	53,54	55,948	27120	44,098
O14	1692,07	52,75	54,893	28720	46,699
O15	1663,53	52,35	53,558	26270	42,715

**Průměrná hodnota pevnosti: 44,80 MPa****Směrodatná odchylka: 1,42 MPa**

## 2.3.21 Vzorčky „P“ – geopolymery + 2% E-glass

Tab. 50 - TEST (7dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
P1	1859,99	49,21	56,291	22950	37,317
P2	1852,14	51,45	58,605	25250	41,057
P3	1872,80	51,40	59,201	26420	42,959
P4	1847,47	51,25	58,230	24000	39,024
P5	1844,38	51,47	58,382	24520	39,870

**Průměrná hodnota pevnosti: 40,04 MPa**

**Směrodatná odchylka: 1,90 MPa**

Tab. 51 - TEST (14dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
P6	1809,94	54,00	60,108	26320	42,797
P7	1813,80	51,78	57,760	25000	40,650
P8	1826,92	51,33	57,672	27250	44,309
P9	1830,20	49,55	55,772	24150	39,268
P10	1809,73	49,52	55,115	26950	43,821

**Průměrná hodnota pevnosti: 42,17 MPa**

**Směrodatná odchylka: 1,92 MPa**

Tab. 52 - TEST (28dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
P11	1698,22	54,54	56,962	25900	42,114
P12	1724,83	53,56	56,815	29000	47,154
P13	1741,66	52,50	56,234	28690	46,650
P14	1689,83	53,69	55,797	24510	39,854
P15	1737,96	54,69	58,455	27350	44,472

**Průměrná hodnota pevnosti: 44,05 MPa**

**Směrodatná odchylka: 2,75 MPa**

## 2.3.22 Vzorčky „Q“ – geopolymery + 30% popílek PRT + 0,5% E-glass

Tab. 53 - TEST (7dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
Q1	1915,11	55,02	64,802	19200	31,220
Q2	1905,65	54,45	63,814	20000	32,520
Q3	1851,20	53,34	60,727	18790	30,553
Q4	1865,59	52,41	60,132	19850	32,276
Q5	1913,57	53,56	63,032	18520	31,740

**Průměrná hodnota pevnosti: 31,66 MPa**

**Směrodatná odchylka: 0,71 MPa**

Tab. 54 - TEST (14dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
Q6	1827,82	55,16	62,006	23770	38,650
Q7	1883,30	53,29	61,722	25120	40,846
Q8	1879,28	54,11	62,538	22350	36,341
Q9	1823,48	52,24	58,584	22810	37,089
Q10	1818,26	55,52	62,084	23180	37,691

**Průměrná hodnota pevnosti: 38,12 MPa**

**Směrodatná odchylka: 1,56 MPa**

Tab. 55 - TEST (28dní)

	hust. [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
Q11	1820,23	52,11	58,334	25410	41,317
Q12	1747,24	54,00	58,026	22980	37,366
Q13	1762,45	54,05	58,585	25740	41,854
Q14	1732,54	52,74	56,195	23200	37,724
Q15	1802,89	54,90	60,872	24050	39,106

**Průměrná hodnota pevnosti: 39,47 MPa**

**Směrodatná odchylka: 1,83 MPa**

**2.3.23 Vzorčky „R“ – geopolymery + 30% popílek PRT + 2% E-glass***Tab. 56 - TEST (7dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
R1	1907,64	53,35	62,590	20100	32,683
R2	1861,33	50,00	57,236	21570	35,073
R3	1888,38	49,89	57,940	21120	34,341
R4	1904,47	55,51	65,016	22330	36,309
R5	1861,13	55,05	63,010	20590	33,479

**Průměrná hodnota pevnosti: 34,37 MPa****Směrodatná odchylka: 1,26 MPa***Tab. 57 - TEST (14dní)*

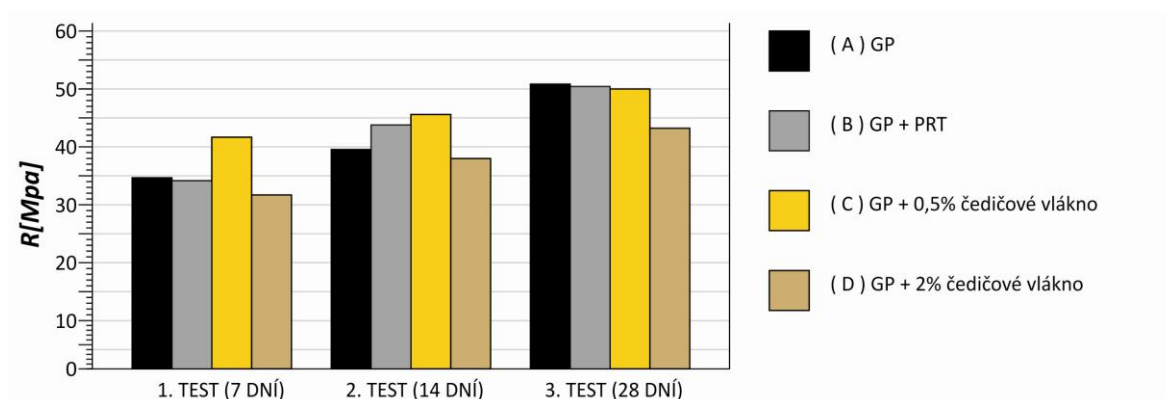
	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
R6	1819,29	54,49	60,967	22220	36,130
R7	1876,60	55,00	63,476	20100	32,683
R8	1803,67	53,81	59,689	21890	35,593
R9	1826,93	53,82	60,470	22450	36,504
R10	1799,00	54,68	60,497	21930	35,659

**Průměrná hodnota pevnosti: 35,31 MPa****Směrodatná odchylka: 1,36 MPa***Tab. 58 - TEST (28dní)*

	hust. [kg.m <sup>-3</sup> ]	výška [mm]	hmotnost [g]	Fmax [N]	R [MPa]
R11	1717,94	51,33	54,232	23900	38,862
R12	1736,51	54,02	57,691	23000	37,398
R13	1742,55	51,67	55,373	20100	32,683
R14	1745,95	55,71	59,819	24210	39,366
R15	1725,36	53,75	57,034	23390	38,033

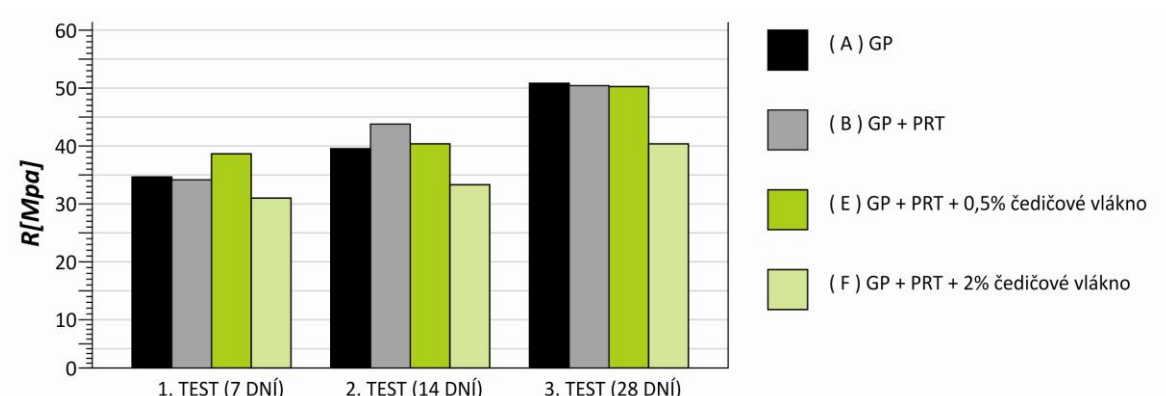
**Průměrná hodnota pevnosti: 37,27 MPa****Směrodatná odchylka: 2,39 MPa**

### 2.3.24 Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + čedičové vlákno



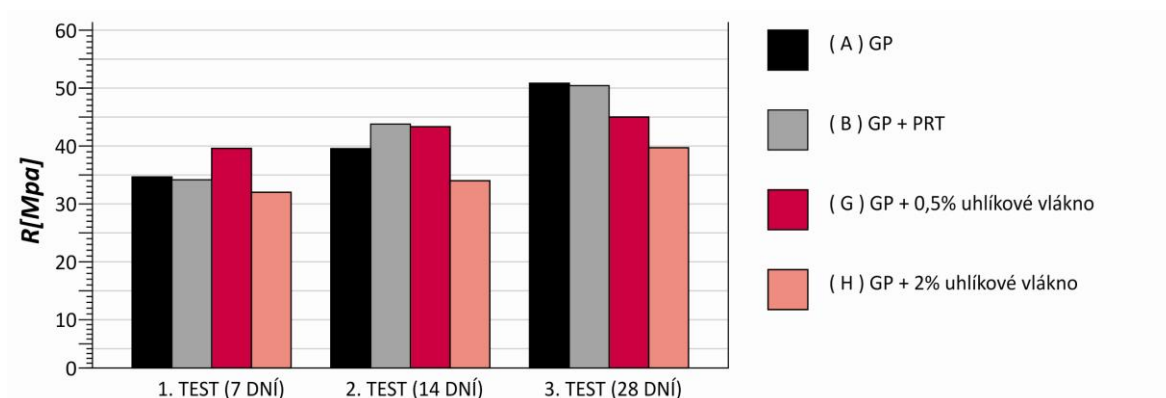
Graf 1

### 2.3.25 Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + PRT + čedičové vlákno



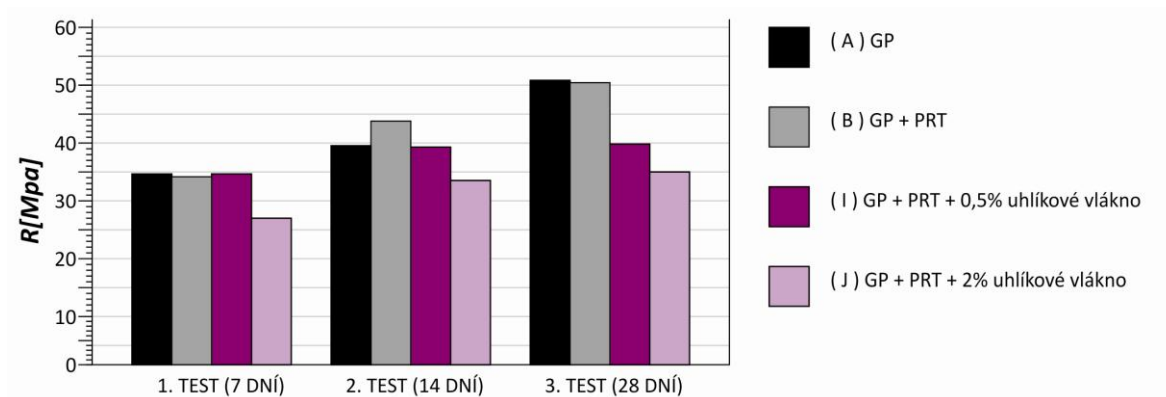
Graf 2

### 2.3.26 Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + uhlíkové vlákno



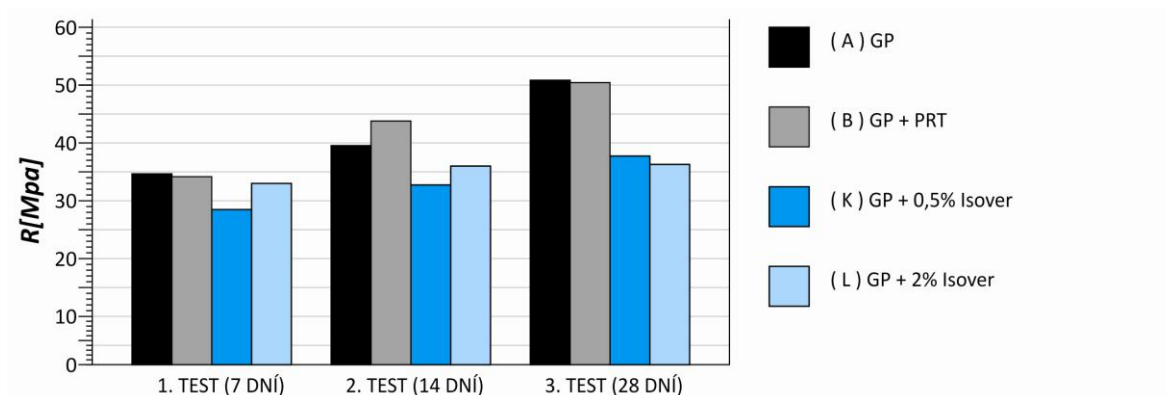
Graf 3

### 2.3.27 Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + PRT + uhlíkové vlákno



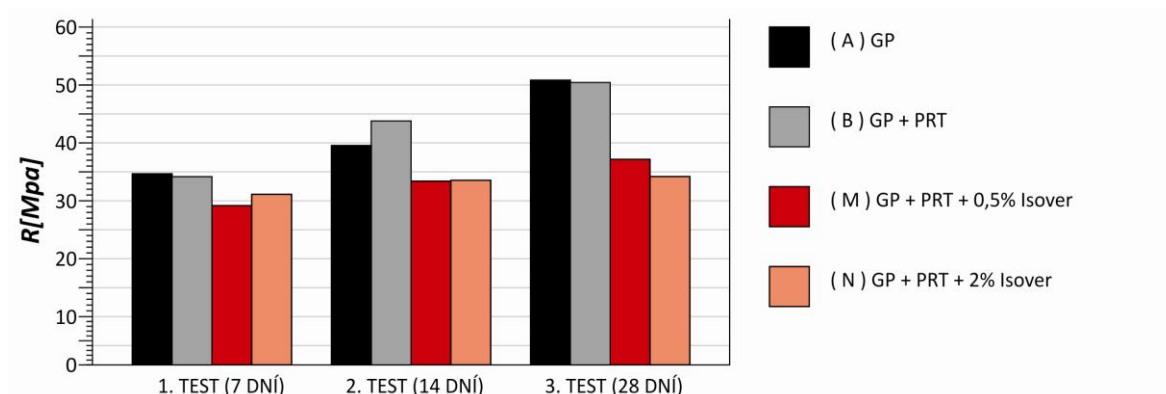
Graf 4

### 2.3.28 Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + Isover



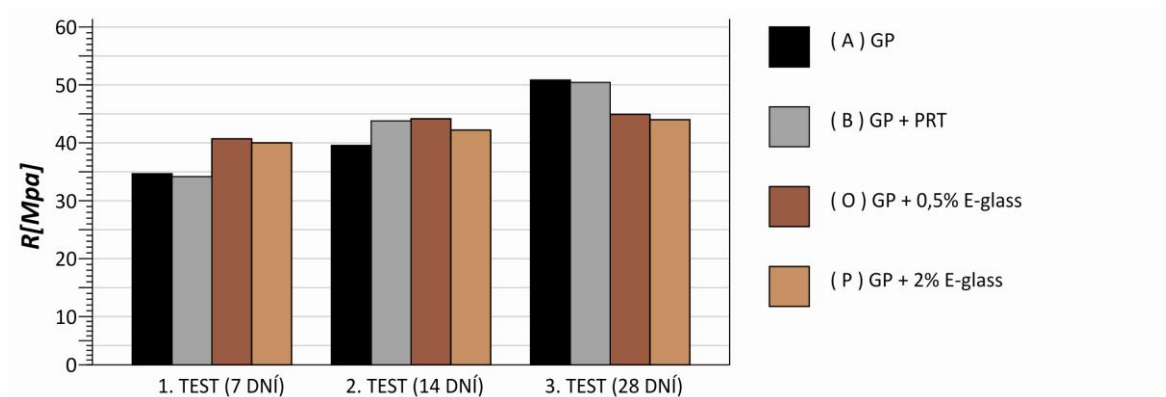
Graf 5

### 2.3.29 Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + PRT + Isover



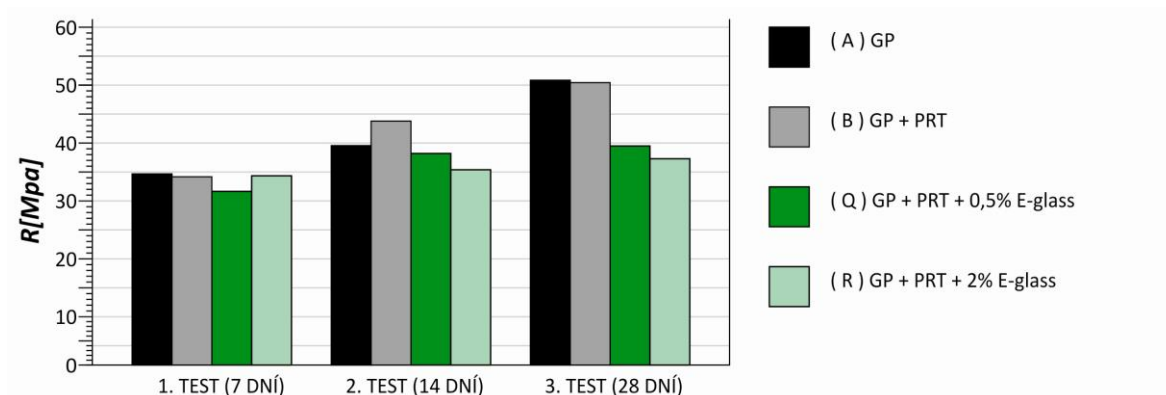
Graf 6

## 2.3.30 Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + E-glass



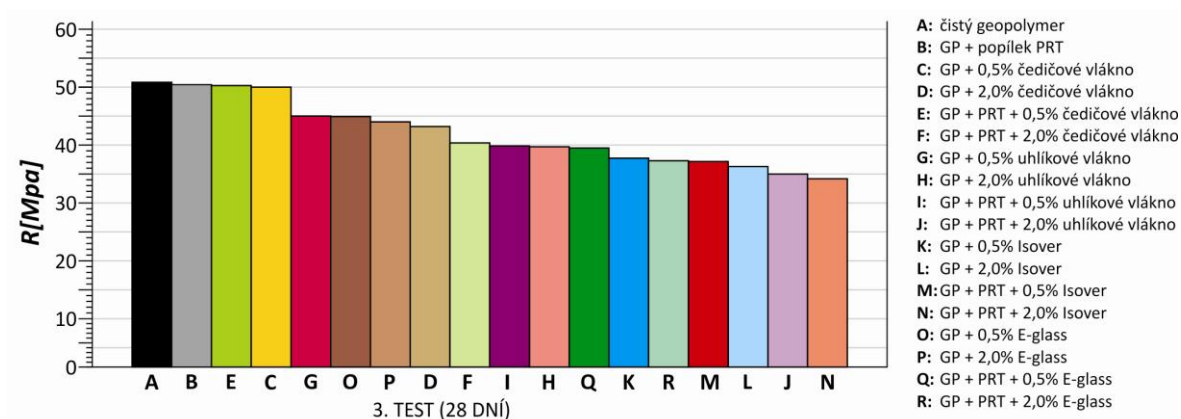
Graf 7

## 2.3.31 Průměrné hodnoty pevnosti – geopolymer + PRT + E-glass



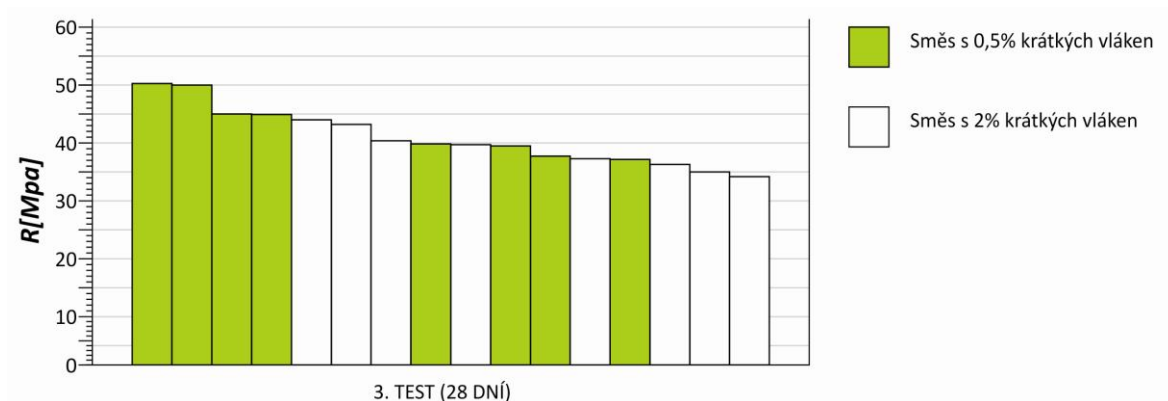
Graf 8

## 2.3.32 Průměrné hodnoty pevnosti – seřazeno



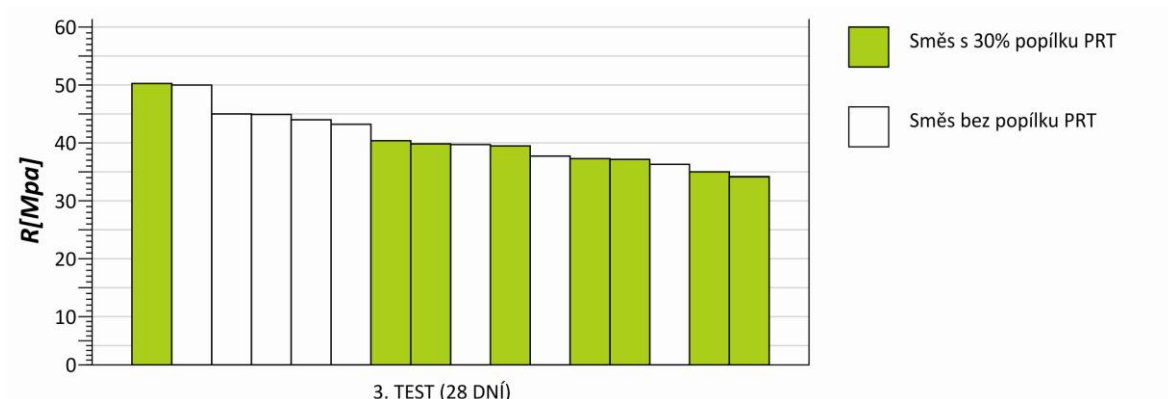
Graf 9

### 2.3.33 Průměrné hodnoty pevnosti – procentuální obsah vláken



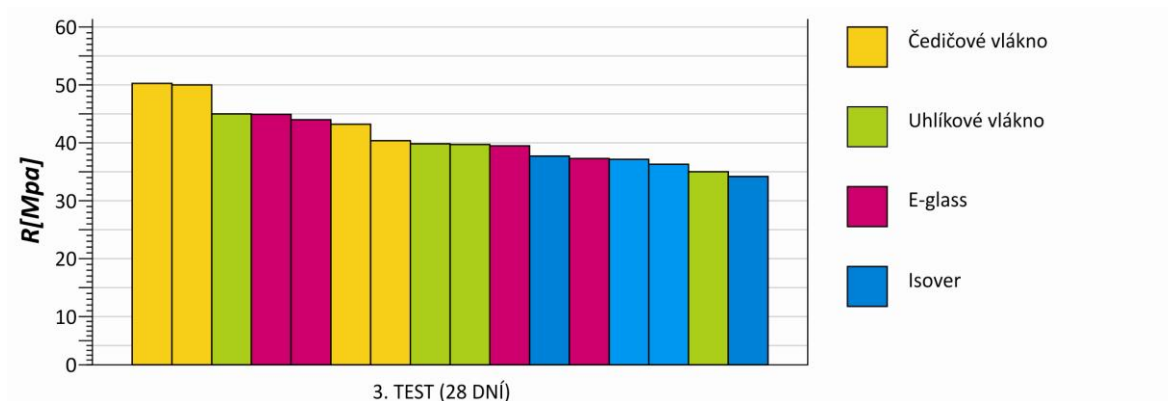
Graf 10

### 2.3.34 Průměrné hodnoty pevnosti – popílek PRT



Graf 11

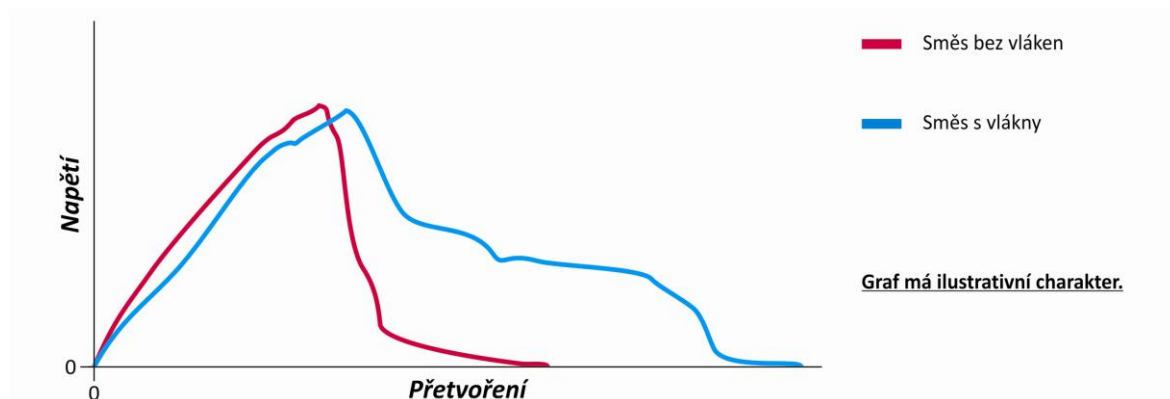
### 2.3.35 Průměrné hodnoty pevnosti – typ vláken



Graf 12



### 2.3.36 Křehkost vzorků



Graf 13

Graf 13 popisuje rozdílný průběh přetvoření vzorku během zkoušky pevnosti v tlaku.



Obr. 16 – Vzorek s příměsí čedičového vlákna

Obrázek 16 znázorňuje testovaný vzorek s příměsí čedičových vláken, který po vyjmutí z trhačky drží celistvou formu. Vzorky z čistého geopolymery, geopolymery + PRT a vzorky s příměsí Isoveru se při dosažení maximální pevnosti prudce tříštily na drobné části.

### 3 HODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Porovnáním naměřených hodnot pevností vzorků jednotlivých složení byly stanoveny tyto závěry:

Nejvyšší hodnoty pevnosti byly naměřeny u vzorků s 0,5% čedičového vlákna, bez ohledu na přítomnost popílku PRT. Tyto hodnoty byly srovnatelné s naměřenou pevností vzorků z čistého geopolymeru a geopolymeru s 30% popílku PRT.

Nejnižší pevnosti byly naměřeny v případě vzorků s obsahem Isoveru, bez ohledu na jeho procentuální obsah, nebo přítomnost popílku PRT.

Vzorky s 2% vláken dosahovaly v průměru nižších pevností, než vzorky s 0,5% vláken. Hlavní příčinou bylo pravděpodobně již nadměrné množství vláknové příměsi, která pak strukturu kompozitu spíše narušuje. Další příčinou mohla být i přítomnost vzduchových bublin, které z důvodu hustší sítě vláken, nebylo možné ze vzorku dokonale odstranit. Na tuto možnou příčinu poukazují i výpočty hustoty některých vzorků.

Isover se ukázal být velmi nevhodným plnivem z důvodu obtížného rozdělení jednotlivých skupin vláken, které se, i přes jeho předešlou úpravu, během míchání směsi stále držely ve žmolcích. Ty pak strukturu materiálu narušují podobně jako vzduchové bubliny.

Nejhorších výsledků, vyjma kompozitu s Isoverem, bylo dosaženo s příměsí E-glass. Přestože při první sérii testů (po 7 dnech) byly výsledky velmi dobré, při následných testech se hodnota pevnosti zvýšila jen minimálně. Důvodem je pravděpodobně degradace skelných vláken v alkalickém prostředí, kterým geopolymerní materiál je a která probíhá v čase.

Jednotlivé druhy odpadních vláken byly k dispozici jen v mírně rozdílných délkách. Rozdíly však přesto pravděpodobně ovlivnily výsledky měření. E-glass a čedičová vlákna byla k dispozici v délce cca 5 – 10 mm, ale uhlíková vlákna byla použita v délce 15 - 20 mm, což mohlo mít, vzhledem k menší velikosti vzorků, negativní vliv na výsledky.

Vzorky s obsahem vláken (čedičová, uhlíková, E-glass) nejevily známky tak vysoké křehkosti jako vzorky z čistého geopolymeru, geopolymeru + PRT a vzorky s příměsí Isoveru.

Vzorky s 30% popílku PRT dosahovaly v průměru nižší pevnosti, než vzorky bez této příměsi.

## 4 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zjistit vliv krátkých odpadních vláken jako příměsi geopolymerních směsí na pevnost výsledných kompozitů.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí.

V teoretické části jsou popsány vlastnosti, využití a ostatní obecné informace o geopolymerech a všech plnivech použitých v experimentu.

V experimentální části je uveden popis zkušební metody, popis zkušebních vzorků, jejich složení a úprava. Dále je v experimentální části popsán pracovní postup a v tabulkách uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty, které jsou zde vyhodnoceny a následně porovnány v grafech.

Vliv vláken v kompozitu byl hodnocen pomocí mechanické zkoušky tlakem.

Bylo zjištěno, že:

1) použitá odpadní vlákna nezvyšují zásadním způsobem hodnoty meze pevnosti v tlaku oproti čistému geopolymeru ani oproti geopolymeru plněnému elektrárenským popílkem s označením PRT.

2) použitá odpadní vlákna mají velký vliv na způsob destrukce vzorku, snižují jeho křehkost.

Výsledky měření lze shrnout do následujících doporučení:

1) při dalším případném testování vlivu krátkých odpadních vláken jako příměsi geopolymerních směsí na pevnost výsledných kompozitů, nepřekročit hodnotu 2% hmotnostního obsahu vláken.

2) při použití krátkých odpadních vláken jako příměsi geopolymerních směsí upřednostnit vlákna čedičová a uhlíková.

## 5 POUŽITÁ LITERATURA

[1] KONÍČKOVÁ, Hana. *Diplomová práce: Využití odpadní pryžové drti z pneumatik jako plniva do geopolymery*

[online]. [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW:

<[http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/14289/kon%C3%AD%C4%8Dkov%C3%A1\\_2010\\_dp.pdf?sequence=1](http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/14289/kon%C3%AD%C4%8Dkov%C3%A1_2010_dp.pdf?sequence=1)>.

[2] VUTchempoint. *Geopolymerace*

[online]. [cit. 2011-9-8]. Dostupné z WWW:

<<http://www.youtube.com/watch?v=J1kZv7umxPk>>.

[3] Geopolymer Institute. *What is a geopolymer? Introduction.*

[online]. [cit. 2011-11-19]. Dostupné z WWW:

<<http://www.geopolymer.org/science/introduction>>.

[4] DĚDEČKOVÁ, Lenka, 21. století. *Geopolymery: Cesta od pyramid k mostům*

[online]. [cit. 2011-10-3]. Dostupné z WWW:

<<http://21stoleti.cz/blog/2010/12/22/geopolymery-cesta-od-pyramid-k-mostum>>.

[5] ŠKVÁRA, František. *Alkalicky aktivované materiály geopolymery*

[online]. [cit. 2011-10-4]. Dostupné z WWW:

<[http://www.vscht.cz/sil/pojiva/geo\\_2007.pdf](http://www.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf)>.

[6] Česká rozvojová agentura o.p.s. *Chemická podstata hmoty.*

[online]. [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW:

<<http://www.claypolymers.com/cz/clay-polymer/podstata-hmoty.html>>.

[7] Geopolymer Institute. *Cements, Concretes, Toxic Wastes, Global Warming.*

[online]. [cit. 2011-10-03]. Dostupné z WWW:

<<http://www.geopolymer.org/science/cements-concretes-toxic-wastes-globalwarming>>.

[8] RAJMANOVÁ, Lenka. Diplomová práce: Využití odpadů krátkých čedičových vláken pro kompozitní materiály

[online]. [cit. 2011-12-9]. Dostupné z WWW:

<<http://www.kht.tul.cz/items/A-DP/dp2010/Rejmanov%C3%A1.pdf>>.

[9] GRABMULLEROVÁ, Ing. *Tescan (KTM TUL) Čedičová vlákna*

[online]. [cit. 2011-12-9]. Dostupné z WWW:

<<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/cedic>>.

[10] KOŘÍNEK, Z. *Vlákna pro kompozity*

[online]. [cit. 2011-12-9]. Dostupné z WWW:

<<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>.

[11] GRABMULLEROVÁ, Ing. *Tescan (KTM TUL) Uhlíková vlákna*

[online]. [cit. 2011-12-9]. Dostupné z WWW:

<<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/?q=cs/uhlik>>.

[12] RAGHAVENDRA R. Hedge and co., *Carbon fi*

[online]. [cit. 2011-12-9]. Dostupné z WWW:

<<http://web.utk.edu/~mse/Textiles/CARBON%20FIBERS.htm>>.

[13] ROSS Anne. *Composites Technology*

[online]. [cit. 2011-12-9]. Dostupné z WWW:

<<http://www.compositesworld.com/articles/basalt-fibers-alternative-to-glass>>.

[14] GRÉGR Jan. *Skleněná vlákna - historie a současnost*

[online]. [cit. 2011-12-9]. Dostupné z WWW:

<<http://www.czechdesign.cz/index.php?lang=1&clanek=34&status=c>>.

[15] SAINT GOBAIN Isover.

[online]. [cit. 2011-10-4]. Dostupné z WWW:

<<http://www.isover.cz>>.

- [16] DAĐOUREK Karel, Doc. Ing., Csc. Skripta TUL (2007): *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. s7, 8, 11, 14, 26 a 45
- [17] TEPELNA-IZOLACE.CZ. *Nejlepší tepelný odpor na trhu tepelně izolačních vat* [online]. [cit. 2011-10-4]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.tepelna-izolace.cz/nejlepsi-tepelny-odpor-na-trhu-tepelne-izolacnich-vat.html>>
- [18] PRAŽSKÁ TEPLÁRENSKÁ. *Popílek* [online]. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.ptas.cz/vedlejsi-energeticke-produkty/popilek/>>
- [19] XIEM Nguyen Thang, Ing. *Tescan (KMT TUL) PRT\_pop\_03.jpg (11-11-2010)*
- [20] XIEM Nguyen Thang, Ing. *PRT.doc (2010)*. s1
- [21] ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY a.s. *Geopolymery* [online]. [cit. 2011-10-3]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.cluz.cz/?page=cz,geopolymery>>